

インドネシアにおける森林火災を受けた 土壌の理化学性について

関 勝 寿 *

Physical, Chemical and Microbiological Properties of Soil Affected by Forest Fire in East Kalimantan, Indonesia

Katsutoshi SEKI*

Abstract

The area of tropical rain forest is decreasing rapidly after 20th century. Recently forest fires are growing in size and frequency. In 1997-1998, 8 million hectares of forest was burned in Indonesia. In this study, physical, chemical and microbiological properties of soil in the fire-affected area of Bukit Bangkirai, East Kalimantan, Indonesia, were studied. Soil properties in the heavily-damaged area, lightly-damaged area, and the area not damaged by fire were compared. The value of pH, in relation to EC (electrical conductivity), was higher at heavily damaged area than other area. This result agrees with previous works showing that pH rises with forest fire because of the ash produced by fire. We also found that activity of free ferric iron oxide is higher in heavily damaged area.

Keywords: Forest fire, Indonesia

1. 序論

熱帯雨林には世界の野生生物種の約半数が生息しているとも言われ、世界の植物群のうちでも最も複雑な構造と豊かな種類組成をもっている。20 世紀以降、熱帯雨林は伐採や農地開発による破壊が進み、急速に減少した。20 世紀に入ってから、気候変動の影響により大規模森林火災が増加したという報告もある (Westerling et al., 2007)。たとえば、インドネシアでは 1997 年から 1998 年にかけてエルニーニョの影響と思われる記録的な異常乾燥が続き、カリマンタン島 (ボルネオ島) とスマトラ島において、インドネシアで記録

*) 東洋大学経営学部 〒 112-8606 東京都文京区白山 5-28-20

Faculty of Business Administration, Toyo University, 5-28-20 Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8606, Japan

に残る過去最大規模の森林火災が発生した。Cochrane (2003) は、森林火災による影響には、生態系に与える影響、二酸化炭素の放出、煙が人間の健康に与える環境および気候変動への影響があるとしている。火災による生態系への影響は、植生への影響 (Wallenius et al., 2004; Simon and Schwab, 2005) のみならず、土壌への影響も重要である。既往の研究では、森林火災による土壌の (1) 有機物、(2) pH、(3) 鉄、(4) 微生物、(5) 撥水性の変化について、報告されている。

(1) 有機物への影響: Knicker et al. (2005) は、南スペインの森林火災地と未火災地の土壌有機物組成を ^{13}C および ^{15}N NMR と質量分析計 (GC-MS) によって測定した。火災後のリター集積により、C と N の量は増加した。Johnson and Curtis (2001) は、火災による土壌炭素と窒素の変化に関して、既往の研究データをまとめて統計的に分析するメタアナリシス手法により分析し、火災による炭素及び窒素の量に対する影響は、火災 10 年後に関して有意差が得られる事を示した。また、計画的火災では土壌炭素が減少し、自然火災では土壌炭素量が増加するという直感に反する結果が得られた。

(2) pH への影響: Ulery et al. (1993) によれば、カリフォルニアの火災によって生じた灰および灰の直下の土壌において、pH が 3 上昇し、10.5 になった。この非常に高い pH の上昇は、K と Na の酸化塩、水酸化塩、炭酸塩によって生じているとした。これらの化合物は溶解性が高く、雨季に溶脱される。Fernandez et al. (1997) は、北西スペインにおける火災による土壌有機物の変化を測定した。火災により pH は上がり、炭素及び窒素は 5 割程度低下した。特に、火災によって微生物に分解されにくいリグニン、セルロース、ヘミセルロースの量が低下した。

(3) 鉄への影響: Ulery and Graham (1993) は、火災によって土の表層が酸化鉄の変化により赤くなり、有機物の変化により下層が黒くなるとした。Ulery et al. (1996) は層状珪酸塩鉱物の変化について調べ、鉄を含む層状珪酸塩の脱水酸化物反応が起きているとした。

(4) 微生物への影響: Acea and Carballas (1996) は、火災による微生物群衆の変化について調べた。長期的には、アンモニア化成菌の影響はなく、セルロース分解菌とデンプン分解菌へは若干の負の影響、亜硝酸と硝酸を生成する菌へは正の影響があるとした。Dumontet et al. (1996) は、基質誘導呼吸法と燻蒸抽出法によって微生物のバイオマスを測定した。火災 11 年後には、C, N, P と土壌バイオマスは未火災地よりも小さかった。Pietikainen et al. (2000) は、腐植を 230°C にて加熱したことによる化学構造の変化を FTIR と ^{13}C NMR にて、微生物群衆の変化をリン脂質脂肪酸と基質利用特性にて、微生物バイオマスを基質誘導呼吸にて調べた。その結果、 230°C にて加熱したことで腐植の化学特性が変化し、微生物群衆構造を変化させると結論づけた。

(5) 撥水性への影響: DeBano (2000) は、火災による撥水性発現のメカニズムについて、以下の様に説明している。(A) 火災を受けていない林では、撥水性は低木直下の落葉層、腐葉層、土壌において発現する。(B) 火災が起きると、撥水性物質が揮発し、温度勾配にしたがって下方へ移動する。(C) 火災が去ったときには、土壌表面と水平に撥水性のある層が存在している。このような撥水性発現機構から、燃焼温度と撥水性発現に関して (1) 土壌温度が低いとき (175°C 以下) には、撥水性にほとんど変化がない (2) 土壌が 175°C から 200°C に加熱されると、著しく撥水性が生じる (3) 燃焼温度が 280°C から 400°C に達

すると撥水性が損なわれる、といった関係があることが分かっている。このようにして撥水性が発現すると、土壌浸食を引き起こしやすくなることで、森林火災後の土壌浸食被害が大きくなる。Scott and Van Wyk (1990) は、南アフリカの森林火災において、表層 1cm よりも深いところで、撥水性が発現し、地表流の増加をもたらしたとした。Johansen et al. (2003) は、ニューメキシコ州の森林火災による土壌浸食と ^{137}Cs 濃度を明らかにするための降雨シミュレーションをした。森林火災によって ^{137}Cs の降下物が堆積し、さらに急速に移動するとした。Rulli et al. (2006) は、イタリアの火災直後の森林で降雨シミュレーション実験を行い、火災が土壌水文特性、地表面流去、土壌浸食に及ぼす影響を調べた。火災直後には大量の土壌浸食が起きるが、火災から 6 年後の地点では、土壌水文特性が回復していた。

Seki et al. (2010) は、インドネシア東カリマンタン州のブキット・バンキライにおける森林火災後の土壌の物理化学特性と水文特性を調べた。火災の影響を受けた場所と受けなかった場所を比較することで、火災による土壌特性の変化について論じた。

本研究では、火災によって生じるとされている土壌特性の変化についての知見を得るために、インドネシアにおいて火災の影響を受けた場所と受けていない場所の土壌の物理性、化学性、微生物を調べた。

2. 調査方法

2.1. 調査地概要

調査地は、ボルネオ島、インドネシア東カリマンタン州のブキット・バンキライである (図 1)。バリクパパンから 58km ほど離れた、東経 160 度 55 分、南緯 1 度に位置し、標高は約 110m である。



図 1 ブキット・バンキライ (Bukit Bangkirai)

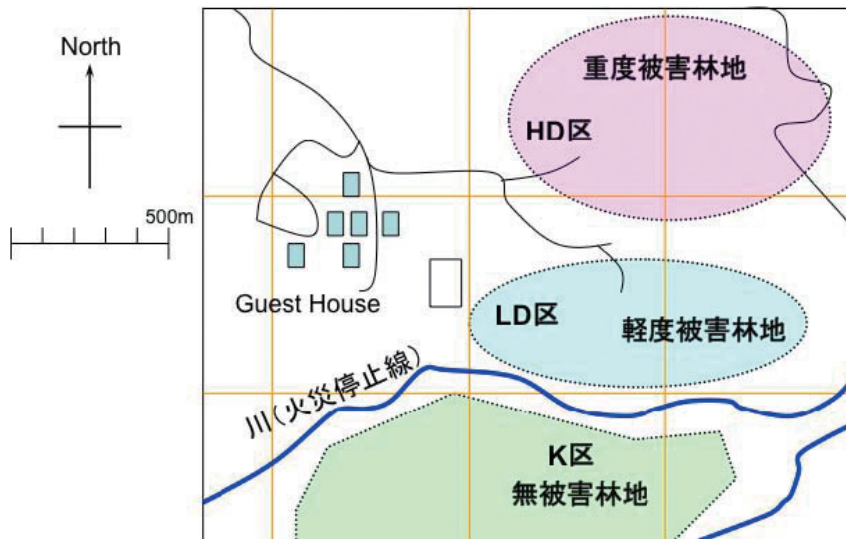


図2 調査地の概要

ブキット・バンキライでは1998年2月から3月にかけて大規模な森林火災が発生したが、川によって山火事が止まったため、火災被害林とともに火災による焼失を免れた天然林が残されている。2001年1月に環境省の地球環境研究総合推進費によって行われた森林概況の調査で、(1) 火災が全く入らなかった林分（無被害林）(2) 火災被害は受けたが上木が部分的に残存している林分（軽度被害林）(3) 火災により上木がほとんど消失した林分（重度被害林）が選定された。この無被害林、軽度被害林、重度被害林に1ヵ所ずつ1haの調査区が設けられ、それぞれK区（Control）、LD区（Lightly-damaged area）、HD区（Heavily-damaged area）としている（図2）。各調査区はさらに10m×10mのサブ区に区分されている。

2.2. 現地調査とサンプリング

HD区の3地点、LD区の4地点、K区の4地点、合計11地点の試料について、それぞれA層とB層の試料を理化学性測定に供した。すなわち、試料数は22である。

2.3. 測定方法

各採取地点、各深さの試料から、土壌の含水比を、生土を105℃、24時間炉乾したときの質量減少率を測定する炉乾法により求めた。pH (H₂O) と、pH (KCl) は、乾燥土と水の質量比が1:2.5となるように土壌を攪拌して測定する1:2.5法により測定した。電気伝導度 (EC) は、1:5法により測定した。水溶性有機炭素 (WSOC; Water Soluble Organic Carbon) と水溶性全窒素 (WSTN; Water Soluble Total Nitrogen) は、1:10法により水中に溶出された有機炭素と全窒素を測定した。アンモニア態窒素は塩化カリウム液侵出法で、全炭素と全窒素は、N.C-Analyzer (Sumigraph NC-90A) により、乾式燃焼法で測定した。強熱減量は、炉乾によって水分をなくした試料を、マッフル炉で800℃、5時間熱するこ

とで、有機物が燃焼した量を質量の減少量から測定した。

土壌の色については、土色計 (SPAD-503) で色相、明度、彩度を測定した。土壌の撥水性については、表面張力試験 MED (Molarity of an Ethanol Droplet) によって測定した。これは、土壌表面に濃度を変化させたエタノール水溶液を滴下したときに、土壌表面中に浸透する速度から撥水性を定量化する手法である。

酸性シュウ酸塩可溶鉄とジオチナイト可溶鉄は、日本土壌肥料科学会監修土壌環境分析 (1997) により測定した。すなわち、酸性シュウ酸塩可溶鉄は、酸性シュウ酸塩溶液によって非晶質、準晶質アルミノケイ酸塩、Al/Fe-腐植複合体および非晶質鉄鉱物を選択的に溶解・抽出して、原子吸光法によって鉄の量を測定した。ジオチナイト可溶鉄は、遊離酸化鉄を還元剤 (ジチオナイト) で還元し、クエン酸キレートとして溶解・抽出して、原子吸光法によって鉄の量を測定した。

微生物数は、FISH 法 (蛍光 in situ ハイブリダイゼーション) で測定した。全菌数は EUB338 をプローブとして、好気性硝化細菌の *Nitrospira* 数は NSR1156 を、偏性嫌気性真正細菌の *Clostridium* は CLOST をプローブとして測定した。

3. 結果

表 1 に測定結果を示す。試料 ID は、測定をした調査区 (HD,LD,K)、調査区内の地点 (1~4)、採取した層位 (A,B) を並べて記した。

全炭素と全窒素の関係を図 3 に示す。土壌中の炭素と窒素の量は、良い相関が見られた ($R = 0.963^{**}$)。K 区 A 層土壌のうちの 1 つのみ、全炭素 18%、全窒素 0.48 という極めて高い有機物含量を示し、その試料において C/N 比が 38 という高い値を示したが、その他の試料では C/N 比は 30 以下であった。特異的に C/N 比が高い 1 つの試料を除いて、全炭素と全窒素の直線回帰から C/N 比を求めたところ、C/N 比は 18 であった。無被害林 (K 区) では、平均的に有機物の量が多く、特異的に有機物量が大い 1 つの試料を除いても、全炭素の平均は K 区で 2.0%、LD 区で 1.5%、HD 区で 0.93% であった。ただし、土性の違いによる有機物の違いもあるため、この結果だけでは火災の影響により有機物が減少したと結論づけることはできない。

水溶性有機炭素と水溶性全窒素の関係を図 4 に示す。両者の間には、相関は見られたものの ($R = 0.593^{**}$)、全炭素と全窒素ほどの良い相関ではなかった。

表1 土壌の理化学測定結果

試料ID	含水比 (wt.%)	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	EC (mSm ⁻¹)	NH ₃ -N (μg g ⁻¹)	WSOC (g μg ⁻¹)	WSTN (g μg ⁻¹)	TC (wt.%)	TN (wt.%)	強熱減量 (wt.%)	明度	彩度	MED (風乾土)	Feo (g kg ⁻¹)	Fed (g kg ⁻¹)	Alb (g kg ⁻¹)	Clostridium /全菌数	Nitrospira /全菌数
HD-1A	6.3	4.68	3.8	3.5	22	82.1	15.9	1.248	0.074	2.98	7	2	0	0.65	1.13	1.80	7.6	26.4
HD-2A	2.	4.05	2.92	5.6	7.1	31.4	3.5	1.124	0.062	2.847	6	1	0.2	0.03	0.04	0.19	6.4	9.8
HD-3A	3.8	4.15	2.81	4.6	9.6	92.2	7.8	1.575	0.108	4.757	5	1	1	0.05	0.08	0.63	2.1	17.4
HD-1B	9.3	4.93	4.09	2	23.7	79.6	14.2	1.04	0.056	3.071	7	2	0	1.33	2.11	4.03	0	4.8
HD-2B	1.	4.39	3.41	3.2	2.8	24.2	1.3	0.265	0.033	0.657	8	1	0	0.00	0.02	0.01	5	4
HD-3B	2.	4.62	3.31	3.8	5.3	45.4	4	0.349	0.019	0.93	8	1	0	0.02	0.04	0.10	5.9	19.2
LD-1A	10.4	4.06	3.53	4	16.1	123.7	17.5	1.513	0.085	4.352	7	2	0	0.84	2.59	2.42	0.7	32.1
LD-2A	13.4	4.02	3.51	4.8	24.3	74.8	15.2	1.368	0.083	4.034	7	3	0	1.99	4.75	1.65	5.1	11.1
LD-3A	13.	3.86	3.46	5.5	18.9	135.9	24.7	1.85	0.096	4.806	7	2	0.4	1.25	1.52	2.49	0.7	6.7
LD-4A	14.6	4.45	3.67	2.6	16.1	79.8	10.7	2.148	0.122	5.509	6	2	0.4	2.20	5.19	4.92	0.6	29.2
LD-1B	11.9	4.16	3.82	3.2	20.5	67.1	15.3	1.148	0.068	3.721	7	3	0	1.32	3.27	3.71	5.4	24.2
LD-2B	14.8	4.15	3.73	3.5	14.9	42.5	12.9	0.921	0.058	3.273	8	3	0	2.56	5.76	2.43	0.9	9.3
LD-3B	13.8	4	3.75	4.7	18.9	75	21.4	1.339	0.092	3.445	7	2	0	1.78	1.98	3.48	3	16.6
LD-4B	16.6	4.44	3.74	2	14.8	52	8.1	1.58	0.077	4.655	7	3	0	3.24	6.46	5.68	1.9	13.4
K-1A	51.1	2.78	2.09	25.2	40.3	1057.2	40.6	18.119	0.477	38.798	5	2	2.6	0.88	1.66	4.50	0	23.6
K-2A	12.5	3.81	3.11	6.8	17.7	205.3	21.7	2.465	0.121	6.123	7	2	1.2	1.73	4.24	3.05	2.7	17.1
K-3A	23.3	3.79	3.22	10.4	37.1	147.5	47.5	3.537	0.215	9.369	7	3	0.4	1.60	7.15	3.98	1.9	7.9
K-4A	8.9	3.87	2.73	5.3	27.8	376.6	27.5	2.949	0.137	7.917	7	2	2.4	0.10	0.31	0.68	1.6	7.9
K-1B	9.8	3.4	2.66	8.7	10.4	459.3	18.7	2.26	0.078	5.23	6	2	0.6	0.24	1.55	1.24	1.7	5.5
K-2B	11.4	4.09	3.46	4.1	15	84.6	14.9	1.185	0.073	3.915	7	3	0	2.69	5.34	3.62	2.1	16.3
K-3B	20.	3.82	3.44	6.6	14.9	52	23.6	1.454	0.091	4.783	7	3	0	2.19	8.24	4.15	0	25.1
K-4B	2.2	4.58	3.54	1.6	11.7	88.4	11.6	0.488	0.018	1.396	8	2	0	0.08	0.23	0.24	3.7	4.7

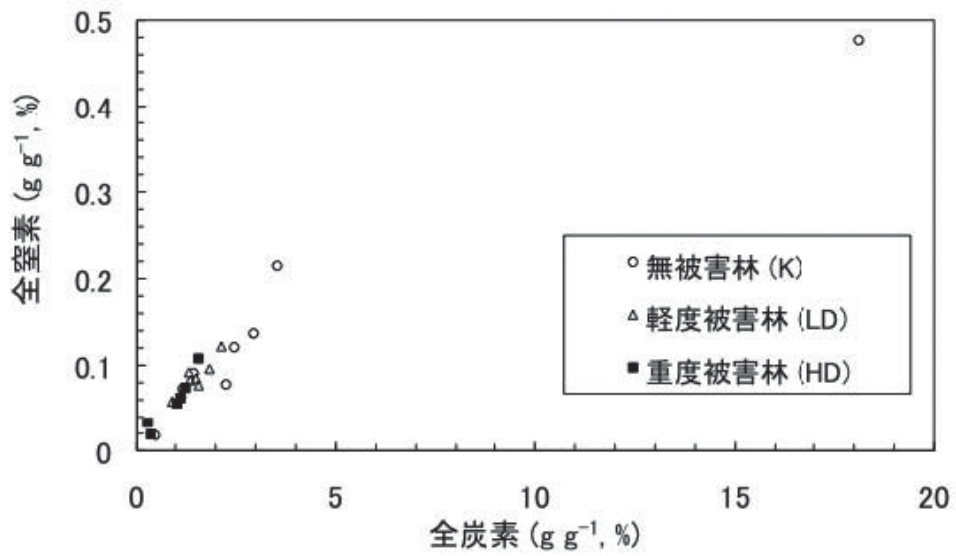


図3 全炭素と全窒素の関係

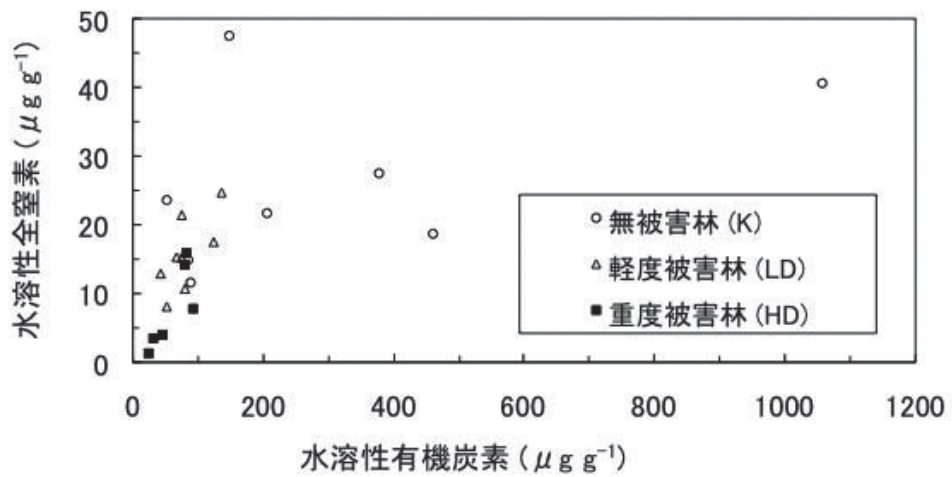


図4 水溶性有機炭素と水溶性有機窒素の関係

図5に水溶性全窒素とアンモニア態窒素の関係を示す。両者の相関は高かった ($R = 0.87^{**}$)。図6に水溶性有機炭素と撥水性の関係を示す。既往の研究から、重度被害林で撥水性が高い層が確認されるものと予測して実験を開始したが、測定結果は重度被害林での撥水性よりも無被害林における撥水性の方が全体的に高かった。また、撥水性は水溶性有機炭素の量との相関があり ($R = 0.77^{**}$)、全炭素とも強い相関があった ($R = 0.93^{**}$)。無被害林における撥水性は、土壌中の有機物質によるものであると考えられた。

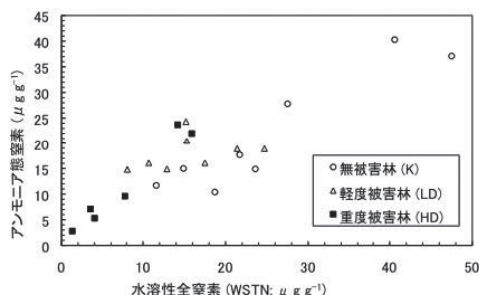


図5 水溶性全窒素とアンモニア態窒素の関係

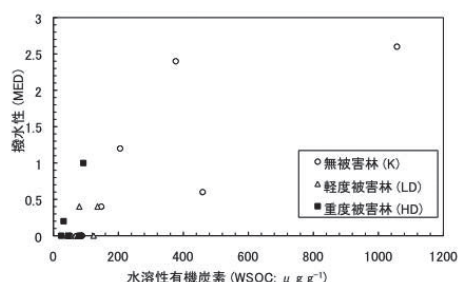


図6 水溶性有機炭素と撥水性の関係

図7に、EC と pH の関係を示す。それぞれの調査区において、EC の対数と pH が直線関係となった。その回帰直線を比べると、K 区と LD 区と比べると、HD 区において pH が高い傾向が見られた。これは、既往の研究において火災によって pH が上昇するとされている効果が、確認できたものと考えられる。

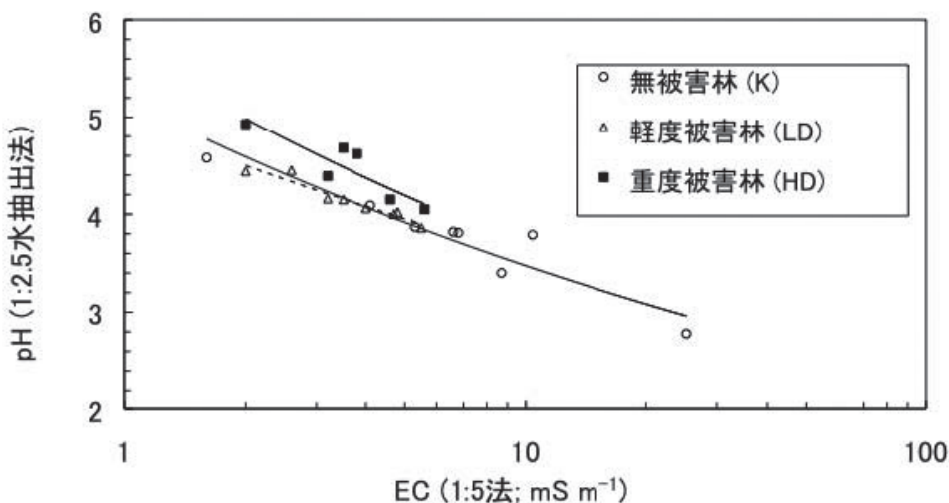


図7 EC と pH の関係

図8に遊離酸化鉄の活性度を示す。酸性シュウ酸塩可溶鉄の濃度をジオチナイト可溶鉄の濃度で割った値が遊離酸化鉄の活性度を示すため、グラフの回帰直線の傾きが、それぞ

れの調査区における活性度をあらわしていることとなる。その値は、無被害林<軽度被害林<重度被害林となり、火災の影響を強く受けるほど、遊離酸化鉄の活性度が高くなる傾向が見られた。

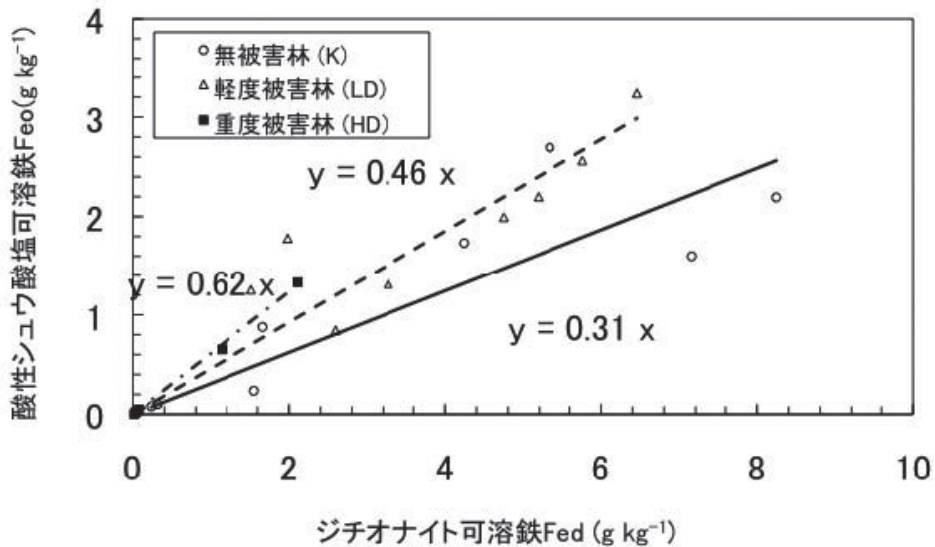


図8 遊離酸化鉄の活性度

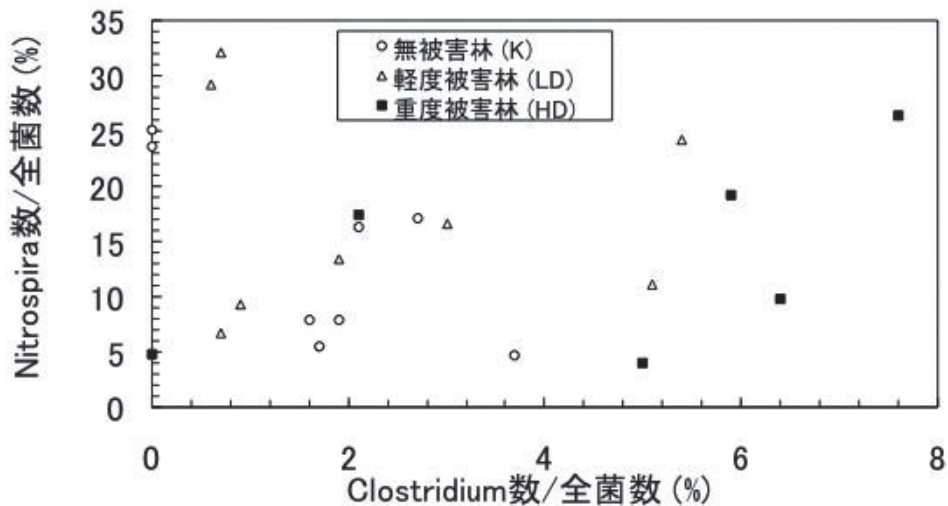


図9 Clostridium と Nitrospira 数の関係

図9に Clostridium 数と Nitrospira 数の関係を示す。今回測定した様々な土壌の物理化学性の測定値と、微生物数との相関を調べたところ、 $P < 0.05$ で有意に相関が見られたのは、

含水比と Clostridium/ 全菌数の負の相関 ($R = -0.52^*$) のみであった。含水比が上昇して嫌気的な条件になることで、偏性嫌気性菌の Clostridium が減少するのは、予想と反する結果であった。今回の調査結果から、調査区における微生物の生態について、一定の知見を得るには至らなかった。

4. 結論

森林火災を受けた土壌の理化学性を調査した結果、以下の知見を得た。EC と pH の関係を調べると、火災被害を受けた林では軽度被害林、無被害林と比べて pH がわずかに高かった。火災による pH の上昇効果が、火災 8 年後の現在も残っているものと思われる。また、火災の影響を受けた区で、遊離酸化鉄の活性度が高くなる傾向が見られた。この結果が、いかなる理由によるものなのか、今後の検討課題となった。

謝辞

本研究にご協力をいただいた農業環境技術研究所の常田岳志博士、東京大学大学院農学生命科学研究科の梶浦雅子、鈴木香織、児玉五月の各氏に感謝します。

参考文献

- Cochrane, M. A. (2003) Fire science for rainforests. *Nature* **421**:p. 913-9.
- DeBano, L. F. (2000) The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of hydrology* **231**:p. 195-206.
- Dumontet, S., H. Diné, A. Scopa, A. Mazzatura and A. Saracino (1996) Post-fire soil microbial biomass and nutrient content of a pine forest soil from a dunal Mediterranean environment. *Soil biology & biochemistry* **28**:p. 1467-75.
- Fernandez, I., A. Cabaneiro and T. Carballas. (1997) Organic matter changes immediately after a wildfire in an Atlantic forest soil and comparison with laboratory soil heating. *Soil biology & biochemistry* **29**:p. 1-11.
- Johansen, M. P., T. E. Hakonson, F. W. Whicker and D. D. Breshears. (2003) Pulsed redistribution of a contaminant following forest fire: Cesium-137 in runoff. *Journal of environmental quality* **32**:p. 2150-7.
- Johnson, L. C. and P. S. Curtis. (2001) Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest ecology and management* **140**:p. 227-38.
- Knicker, H., F. J. Gonzalez-Vila, O. Polvillo, and G. Almendros. (2005) Fire-induced transformation of C- and N- forms in different organic soil fractions from a Dystric Cambisol under a Mediterranean pine forest (*Pinus pinaster*). *Soil biology & biochemistry* **37**:p. 701-18.

- 日本土壤肥料科学会 (1997) 土壤環境分析法 . 博友社 .
- Pietikainen, Hiukka and Fritze (2000) Does short-term heating of forest humus change its properties as a substrate for microbes? *Soil biology & biochemistry* 32:p. 277-88.
- Rulli, M. C., S. Bozzi, M. Spada, D. Bocchiola and R. Rosso. (2006) Rainfall simulations on a fire disturbed mediterranean area. *Journal of hydrology* 327:3-4.
- Scott, D. F. and D. B. van Wyk. (1990) The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behaviour of an afforested catchment. *Journal of hydrology* 121:p. 239-56.
- Seki , K., T. Nishimura, M. Mizoguchi, H. Imoto and T. Miyazaki (2010) Physical and chemical properties of soils in the fire-affected forest of East Kalimantan, Indonesia. *Journal of Tropical Fire Science* 22(4):414-424.
- Simon and Schwab. (2005) Plant community structure after wildfire in the subarctic forests of western Labrador. *Northern journal of applied forestry* 22:p. 229-35.
- Ulery, Graham and Bowen. (1996) Forest fire effects on soil phyllosilicates in California. *Soil Science Society of America journal* 60:p. 309-15.
- Ulery, A. L. and R. C. Graham. (1993) Forest fire effects on soil color and texture. *Soil Science Society of America journal* 57:p. 135-40.
- Ulery, A. L., R. C. Graham and C. Amrhein (1993) Wood-ash composition and soil pH following intense burning. *Soil science* 156:p. 358-64.
- Wallenius, T. H., T. Kuuluvainen and I. Vanha-Majamaa. (2004) Fire history in relation to site type and vegetation in Vienansalo wilderness in eastern Fennoscandia, Russia. *Canadian journal of forest research* 34:p. 1400-9.
- Westerling, A.L., H. G. Hidalgo, D. R. Cayan and T. W. Swetnam. (2007) Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity. *Science* 313:940-943.